



# **SÄÄDETTÄVIEN SÄHKÖMOOTTOREIDEN VERTAILU**

Ville Koppanen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2015  
Talotekniikan  
koulutusohjelma  
Sähköinen talotekniikka

# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan koulutusohjelma  
Sähköinen talotekniikka

KOPPANEN, VILLE:  
Säädettävien sähkömoottoreiden vertailu

Opinnäytetyö 41 sivua.  
Huhtikuu 2015

---

Säädettäviä sähkömoottoreita käytetään monissa taloteknisissä sovelluksissa, mm. puhaltimien moottoreissa ja pumpuissa. Säädöllä on mahdollista toteuttaa esimerkiksi tarpeenmukainen ilmanvaihto, jolla saavutetaan hyvä sisäilma. Samalla säästetään energiaa, kun puhaltimet eivät käy jatkuvasti täydellä teholla. Taajuusmuuttajakäyttöinen oikosulkumoottori on ollut jo pitkään hyvä ratkaisu kohteisiin, joissa on tarvittu säädettävää sähkömoottoria. Viime aikoina markkinoille on tullut uusia moottorityyppejä: PM-moottori, EC-moottori ja tahtireluktanssimoottori. Uudet moottorityypit ovat vielä monille vieraita. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää moottoreiden ominaisuudet, vertailla niitä keskenään ja pohtia, mitkä ovat moottoreiden hyvät ja huonot puolet, ja milloin mitäkin moottoria kannattaa käyttää. Tämä insinöörityö on tehty Insinööritoimisto AX-LVI Oy:n toimeksiannosta.

Työssä tutkittiin eri moottoreita lukemalla aiheesta kirjallisuutta ja tutkimusraportteja, tutkimalla valmistajien esitteitä, käyttö- ja asennusohjeita, haastattelemalla puhallinvalmistajan edustajaa ja tekemällä kustannuslaskelmia ilmanvaihtokoneiden mitoitusohjelmalla. Laskennoissa selvisi, että ilmanvaihtokoneissa PM-moottorit ovat energiatehokkuudeltaan parhaita, IE3-luokan oikosulkumoottorit tulivat toiseksi ja IE2-luokan moottorit olivat huonoimpia. Hankintahintojen puolesta PM-moottorit olivat kalleimpia, ja IE2-luokan halvimpia. EC-moottorit yltyivät energiatehokkuudessa IE3-luokan moottorin tasolle, mutta ne ovat tehoiltaan pieniä, minkä vuoksi niitä ei ollut saatavissa kaikkiin laskemissa käytettyihin ilmanvaihtokoneisiin. Tahtireluktanssimoottoria ei ole vielä lainkaan ilmanvaihtokonevalmistajan valikoimissa, todennäköisesti sen suurien moottorikokojen vuoksi.

Työssä selvisi, että PM-moottorin ainoa huono puoli verrattuna perinteiseen oikosulkumoottoriin on se, ettei sitä voi käyttää ohituskäytöllä eli ilman taajuusmuuttajaa. PM-moottori on myös kalliimpi. EC-moottorin huonoja puolia ovat saatavilla olevien mallien pienitehoisuus, joidenkin taajuusmuuttajan ominaisuuksien puute ja huoltojen vaikeus. Hyvänä puolena on pienten, alle yhden kW:n EC-moottoreiden edullinen hinta ja hyvä energiatehokkuus. Tahtireluktanssimoottorit ovat pienimmillään 11kW:n koneita, joten ne ovat vielä liian suuria useimpiin taloteknisiin ratkaisuihin. Ne ovat energiatehokkuudeltaan PM-moottorin tasolla, mutta edullisempia, joten ne saattavat tulevaisuudessa olla paras moottorivaihtoehto, jos niitä saadaan pienennettyä. Tässä työssä keskitettiin enimmäkseen moottorien puhallinkäyttöön, kuitenkin saatuja tuloksia voi soveltaa muihinkin käyttökohteisiin.

---

Asiasanat: sähkömoottoreiden vertailu, PM-moottori, EC-moottori, tahtireluktanssimoottori, oikosulkumoottori.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Building Services Engineering  
Electric Building Services

KOPPANEN, VILLE:

Comparison of Adjustable Electric Motors: AC motors and PM-engines

Bachelor's thesis 41 pages.

April 2015

---

Adjustable electric motors are used in many buildings applications. Such as fan and pump engines. Adjustable motors make it possible to implement demand-controlled ventilation. That supports save energy without compromising air quality. AC-motor with frequency converter has been a good solution for applications where adjustable electric motor is needed. Recently, new engine types have entered the market, namely: PM-engine, EC-engine and synchronous reluctance motors. New types of motor are still unfamiliar to most people. The aim of this thesis is to compare the features of these engines, determine their good and bad qualities, and to figure out when certain type of motor should be used. This bachelor's thesis is made in cooperation by AX-LVI Consulting Ltd.

Different types of engines are studied by reading literature and research reports about the subject and reading engines brochures, operation manuals and installation instructions. Representative of fan maker were also interviewed. In addition cost calculations of ventilation unit dimensioning program were done. The calculations discovered that in ventilation units PM-engines are most energy efficient of these alternatives. IE3-class engines became second and IE2-class engines were the worst. On the other hand purchase price of PM-engines were highest and IE2-class engines were most inexpensive. EC-engines are as good as IE3-class engines in the meaning of energy efficiency, but they are available only in smaller power ranges, so they weren't used in all calculations. Synchronous reluctance motor is not yet available in selection of ventilation unit's manufacturer, probably because of its high power ranges.

The results were that the only weakness in PM-motors is that they can't be used without frequency converter. PM-engine is also more expensive. Bad quality of EC-motors are poor availability of bigger engine sizes, lack of frequency converters diverse features and difficulty of maintenance. Good things in EC-motors are low purchase price of small, especially under 1 kW motors, and good energy efficiency. Synchronous reluctance motors are at least 11 kW motors, so they are too big for most applications in buildings. By their energy efficiency they are in the same level with PM-motors, but they are less expensive, so they might be the best engine for building applications in the future, if smaller engine sizes become available. In this thesis I have been discussing mostly about fan engines, but results can be applied in other applications also.

---

Key words: comparison of adjustable electric engines, PM-motor, EC-motor, synchronous reluctance motor, AC-motor.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	SÄÄDETTÄVILLÄ SÄHKÖMOOTTOREILLA SAAVUTETTAVAT HYÖDYT .....	6
3	MOOTTOREIDEN VALINTAAN VAIKUTTAVAT SÄÄDÖKSET JA LUOKITUKSET .....	9
3.1	SFP-luku .....	9
3.2	E-luku.....	9
3.3	IE-hyötysuhdeluokitus .....	10
4	SÄÄDETTYJEN SÄHKÖMOOTTOREIDEN TOIMINTAPERIAATTEET JA OMINAISUUDET .....	12
4.1	Oikosulkumoottori + taajuusmuuttaja .....	12
4.1.1	Rakenne ja toimintaperiaate .....	12
4.1.2	Hyötysuhde .....	13
4.2	EC-moottori .....	15
4.2.1	Rakenne ja toimintaperiaate .....	15
4.2.2	Hyötysuhde .....	16
4.2.3	EC-moottori verrattuna oikosulkumoottoriin ja PM-moottoriin.....	17
4.3	PM-moottori + taajuusmuuttaja .....	18
4.3.1	Rakenne ja toimintaperiaate .....	19
4.3.2	Hyötysuhde .....	20
4.3.3	PM-moottori verrattuna oikosulkumoottoriin.....	21
4.4	Tahtireluktanssimoottori + taajuusmuuttaja .....	21
4.5	Lyhyt vertailu ominaisuuksista .....	22
4.6	Moottoreiden hyötysuhteiden vertailu .....	24
5	LASKENNAT .....	29
5.1	1m <sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet.....	31
5.2	5m <sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet.....	32
5.3	10m <sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet.....	34
6	POHDINTA.....	37
	LÄHTEET .....	40

## 1 JOHDANTO

Ympäristöystävällisyys, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja sen myötä energiakulutuksen vähentäminen on ajankohtainen puheenaihe. Kiinteistöissä suurimpia sähkönkuluttajia ovat valaistus ja ilmanvaihto. Valaistuksen energiankulutusta on mahdollista vähentää huomattavasti käyttämällä moderneja, energiatehokkaita valaisimia, sekä älykästä valaistuksenohjausjärjestelmää. Ilmanvaihdon puhaltimien ja LVI-järjestelmän pumppujen energiankulutusta on myös mahdollista alentaa huomattavasti käyttämällä säädettäviä puhaltimia ja pumppuja ja ohjaamalla niitä tarpeenmukaisesti. Tarpeenmukainen ohjaus ei kuitenkaan vähennä energiankulutusta silloin, kun moottorit käyvät täydellä teholla. Valaistuksessa esimerkiksi LED-valaisimilla saavutetaan huomattavia säästöjä verrattuna vanhanaikaisiin valaisimiin, myös valaistuksen ollessa täydellä teholla. Tärkeää olisi selvittää, onko nykyaikaisilla moottoreilla mahdollista saavuttaa vastaavia energiansäästöjä LVI-puolella.

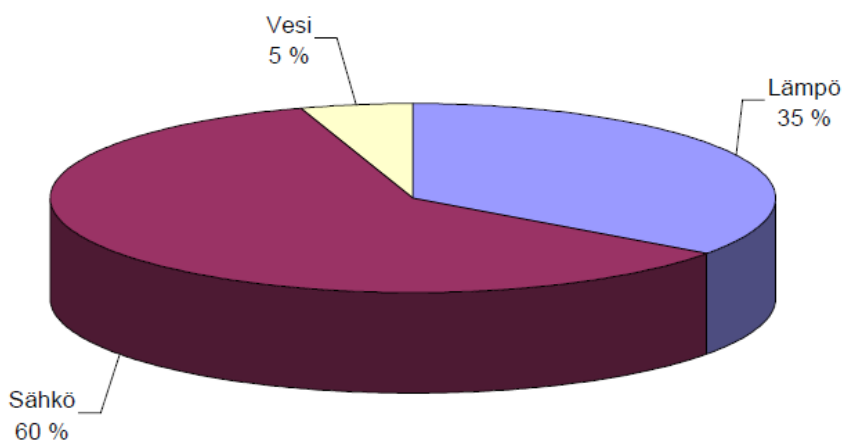
Säädettäviä sähkömoottoreita käytetään monissa paikoissa: esimerkiksi tulo- ja poistoilmakoneissa kanavapaineen säätämiseksi tai lämpö- ja jäähdytysverkostossa putkiston paineen säätämiseksi. Lisäksi käyttämällä säädettäviä sähkömoottoreita on mahdollista säätää pumppuja ja puhaltimia tarpeenmukaisesti: esimerkiksi ohjata ilmanvaihtoa osateholle, kun täydelle ilmanvaihdolle ei ole tarvetta, tai säätää LVI-järjestelmien pumppuja ja puhaltimia kanavien ja verkostojen paineen mukaan. Taajuusmuuttajasäätöinen oikosulkumoottori on ollut jo pitkään suosittu yhdistelmä lähes kaikissa säädettävää sähkömoottoria tarvitsevilla sovelluksilla. Nykyään tarjolla on myös muita säädettäviä sähkömoottoreita: EC-moottori, PM-moottori ja tahtireluktanssimoottori.

Uudet moottorit ovat vielä monille vieraita, eikä niiden ominaisuuksista sekä hyvistä ja huonoista puolista ole kaikilla tietoa. Tämän insinööritoimiston tarkoituksena on selvittää, miten erityyppiset moottorit eroavat toisistaan ominaisuuksiltaan sekä käyttökuluiltaan, ja missä tapauksessa tietynlaisia moottoreita kannattaisi käyttää. Työ tehdään Insinööritoimisto AX-LVI Oy:n toimeksiannosta.

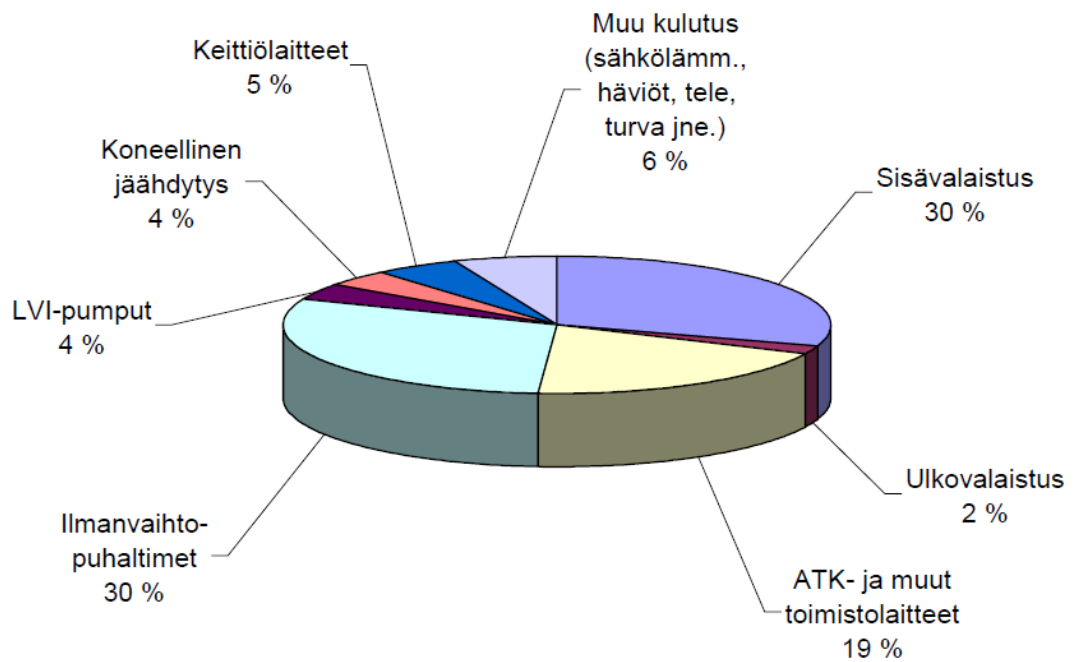
## 2 SÄÄDETTÄVILLÄ SÄHKÖMOOTTOREILLA SAAVUTETTAVAT HYÖDYT

Karkeasti arvioituna tyypillisen toimistorakennuksen kustannuksista veden osuus on 5%, lämmön 35% ja sähkön 60% (Kuva 1) (Reinikainen 2002, 12). Sähköenergiasta suurin osa kuluu valaistukseen ja ilmanvaihdon puhaltimiin. Ilmanvaihdon osuus on noin 30% koko rakennuksen sähkönkulutuksesta, eli yhtä suuri kuin sisävalaistuksen sähkönkulutus. LVI-pumput ja koneellinen jäähdytys puolestaan käyttävät molemmat 4% sähköenergiasta (Kuva 2), joten LVI järjestelmä käyttää yhteensä noin 40% koko kiinteistön sähköenergiasta (Reinikainen 2002, 13).

Vanhoissa rakennuksissa lämpöenergiaa kuluu selvästi enemmän kuin sähköä. Nykyaikaisissa rakennuksissa energijakauma on päinvastainen, lämpöenergian kulutusta on saatu selvästi vähennettyä, mutta sähkönkulutus on kasvussa. Valaistuksen sähkönkulutus ja sen osuus kokonaiskulutuksesta pienenee jatkuvasti uusien energiatehokkaampien valaisimien ja tarpeenmukaisen valaistuksen ohjauksen ansiosta. (Reinikainen 2002, 14.)



Kuva 1 Tyypillisen toimistorakennuksen energiankulutus (Reinikainen 2002, 12)



Kuva 2 Tyypillisen toimistorakennuksen sähkönkulutus (Reinikainen 2002, 13)

Ilmanvaihto on yksi suurimmista sähkön kuluttajista kiinteistöjen taloteknisissä järjestelmissä. Tästä syystä ilmanvaihdon sähköenergian kulutuksen pienentäminen vaikuttaa selvästi koko kiinteistön energiankulutukseen (Sahlstén 2012b, 1). LVI-järjestelmän laitevalinnoilla on siis suuri merkitys, kun aletaan miettiä ympäristöystävällisyyttä ja sähkön hintaa.

Puhaltimien sähkönkulutukseen voidaan vaikuttaa erityisesti suunnitteluvaiheessa. Puhaltimien sähkönkulutukseen vaikuttavia asioita ovat:

- Käyntiaika / Ilmavirta
  - tarpeenmukaisella ilmavirran säädöllä puhallin voi käydä välillä osatehoilla, tai olla jopa pysähdyksissä. Sääto voi tapahtua esimerkiksi läsnäolon tai CO<sub>2</sub> pitoisuuden mukaan.
- Puhaltimen paineenkorotus
  - ahtaista kanavista johtuvat kanavistohäviöt
  - koneen häviöt
  - liittynät
- Järjestelmän hyötysuhteet
  - puhallin
  - moottori
  - vaihteisto/kiilahihna
  - puhaltimen säätötapa

(Reinikainen 2002, 24)

Hyvin suunniteltu järjestelmä voidaan vielä pilata huonolla huollolla. Likaantuneet suodattimet ja likainen kanavisto, sekä likainen LTO voivat aiheuttaa huomattavia painehäviöitä, joka lisää puhaltimen sähkönkulutusta ja lisäksi LTO:n hyötysuhteen heikentymisen sekä järjestelmän käyttöiän lyhentymisen. (Reinikainen 2002, 35.)

Säästöjä ilmanvaihdon energiankulutuksessa on mahdollista tehdä myös vanhoissa rakennuksissa. Puhaltimet voi vaihtaa energiatehokkaammiksi ja tarpeen mukaan toimiviksi. (Sahlstén 2012a, 1.) Puhaltimien ja pumppujen tarpeenmukainen säätö kannattaa tehdä tarpeenmukaiseksi aina kun siihen on mahdollisuus. Sädöllä voidaan säästää suuriakin määriä energiaa, ja takaisinmaksuajat ovat yleensä todella lyhyitä. Puhaltimen nopeuden alentaminen alentaa sähkönkulutusta huomattavasti, sillä puhaltimen tehontarve on verrannollinen pyörimisnopeuden kolmanteen potenssiin. Samalla myös tuulilman lämmitystarve laskee.



### 3 MOOTTOREIDEN VALINTAAN VAIKUTTAVAT SÄÄDÖKSET JA LUOKITUKSET

Ilmastonmuutos ja sen hillitsemiseksi hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ollut ajankohtainen puheenaihe jo jonkin aikaa. Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi EU:ssa on otettu tavoitteeksi parantaa energiatehokkuutta 20% vuodesta 2005 vuoteen 2020 mennessä. EU:ssa on todettu, että kustannustehokkain ja tärkein tapa vähentää energiankulutusta on säästää energiaa ja parantaa energiatehokkuutta. (Sahlstén 2012b, 1.)

#### 3.1 SFP-luku

Suomessa ympäristöministeriö on asettanut rajat sähkötehon määrälle suhteessa ilmamäärään koneellisessa ilmavaihdossa rakennusten energiatehokkuutta koskevissa rakentamismääräyksissä vuonna 2012. Koneellisen poistoilmajärjestelmän ominaissähköteho saa olla enintään  $1.0\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  ja vastaavasti tulo- ja poistoilmajärjestelmän ominaissähköteho saa olla enintään  $2.0\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ . Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho voi kuitenkin olla edellä mainittuja suurempi, jos esimerkiksi rakennuksen sisäilmaston hallinta edellyttää tavanomaisesta poikkeavaa ilmastointia. (D3 2012, 15.)

#### 3.2 E-luku

Vuonna 2012 voimaan astuneissa rakentamismääräyksissä on otettu käyttöön kertoimet, joilla rakennuksen kokonaisenergiankulutus, E-luku, on laskettava. E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. E-luku saadaan laskemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain. Kertoimilla on pyritty ohjaamaan erityisesti sähkönkulutuksen vähentämiseen kiinteistöissä. Mitä suurempi kerroin on, sitä enemmän se vaikuttaa koko kiinteistön energiatehokkuuteen. Kertoimet ovat:

- sähkö	1,7
- fossiiliset polttoaineet	1,0
- kaukolämpö	0,7
- rakennuksissa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5

- kaukojäähdytys

0,4

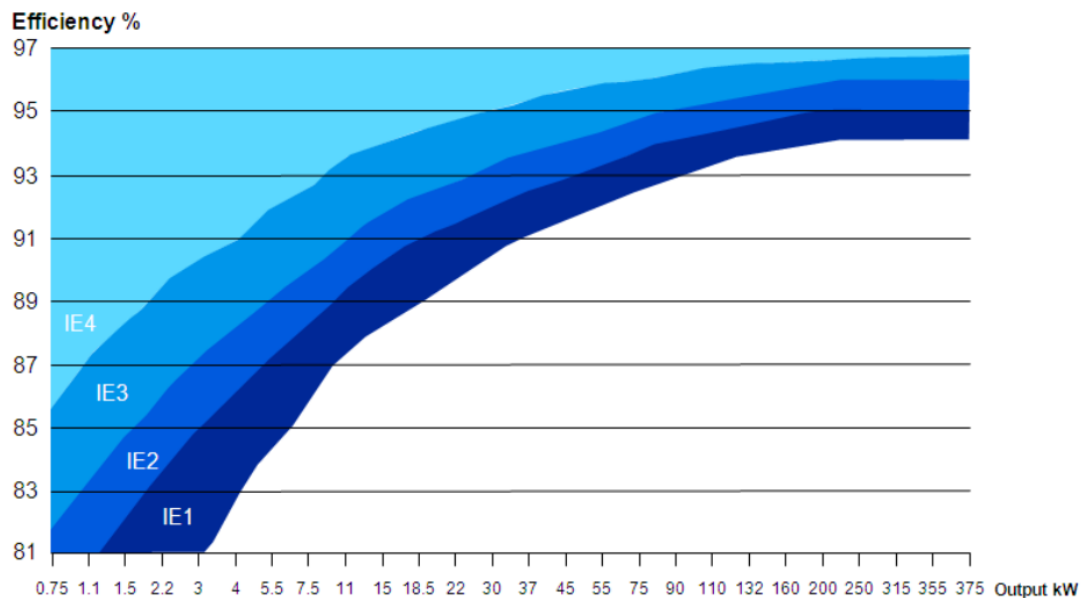
(D3 2012, 8.)

Sähkön korkeasta kertoimesta johtuen pienikin säästö sähkönkulutuksessa vaikuttaa kiinteistön laskennalliseen energiatehokkuuteen. Esimerkiksi, jos tahdottaisiin vaikuttaa E-lukuun vähentämällä kaukolämmön tai sähkön kulutusta, kaukolämmön kulutusta pitäisi vähentää yli kaksinkertaisesti verrattuna sähkönkulutukseen.

### 3.3 IE-hyötysuhdeluokitus

IEC:n standardi IEC 60034-30 määrittelee 400V sähkömoottoreille IE-hyötysuhdeluokitukset (IE=International Efficiency) moottoreiden tehon ja hyötysuhteen mukaan (Taulukko 5). IE-luokat kattavat 2-, 4-, ja 6- napaiset 0,75-375kW alle 1000V moottorit (Vuorivirta 2014, Sahlstén 2012b, 3).

Taulukko 1. IE-luokitukset



IE-hyötysuhdeluokat:

IE1= standard efficiency

= standardi (ei enää sallittu)

IE2= high efficiency

= korkea (sallittu vain taajuusmuuttajakäytössä)

IE3= premium efficiency

= erityisen korkea

IE4= super premium efficiency

= erittäin korkea

16.6.2011 alkaen moottoreiden on täytynyt täyttää hyötysuhdeluokka IE2. 1.1.2015 tehoalueen **7,5** – 375kW moottoreiden on täytynyt täyttää hyötysuhdeluokka IE3, tai hyötysuhdeluokan IE2 moottori on täytynyt asentaa taajuusmuuttajakäyttöisenä. 1.1.2017 alkaen myös tehoalueen **0,75** - 375kW moottoreiden on täytettävä hyötysuhdeluokitus IE3, tai hyötysuhdeluokan IE2 moottori on asennettava taajuusmuuttajakäyttöisenä. (Vuorivirta 2014) Voimassa olevaa IE-luokitusta huonomman hyötysuhteen omaavan moottorin käyttöönotto on kuitenkin sallittua, jos moottori on hankittu ennen luokituksen voimaantulopäivämäärää (Sahlstén 2012b, 3).

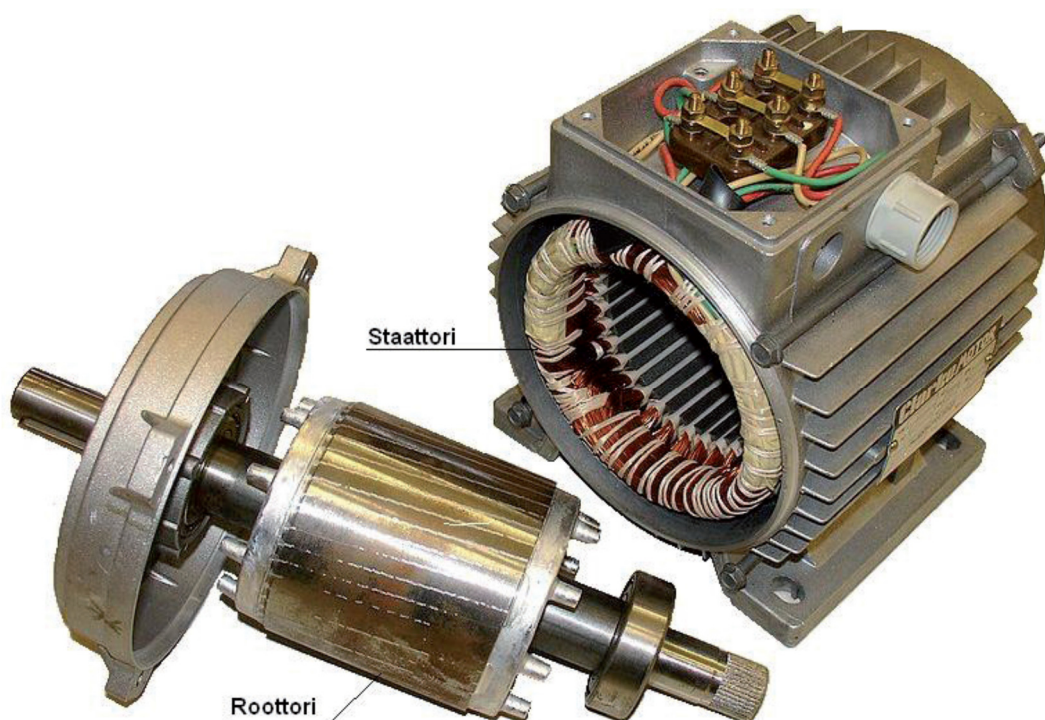
## 4 SÄÄDETTYJEN SÄHKÖMOOTTOREIDEN TOIMINTAPERIAATTEET JA OMINAISUUDET

### 4.1 Oikosulkumoottori + taajuusmuuttaja

Oikosulkumoottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi, induktimoottoriksi ja AC-moottoriksi. Oikosulkumoottori on todella yleisesti käytetty moottorityyppi ja sitä on mahdollista käyttää ilman taajuusmuuttajaa suoralla syötöllä tai taajuusmuuttajan kanssa.

#### 4.1.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin uloin osa on kiinteä lieriömäinen valurautakotelo, jossa on kiinteä seisojakäämitys, eli staattori. Staattorin sisällä on pyörivä roottori, johon akseli on kiinnitetty. Akseli on kiinnitetty valurautakoteloon laakereilla (Kuva 3).



Kuva 3 Oikosulkumoottori (Sahlstén 2012b, 3)

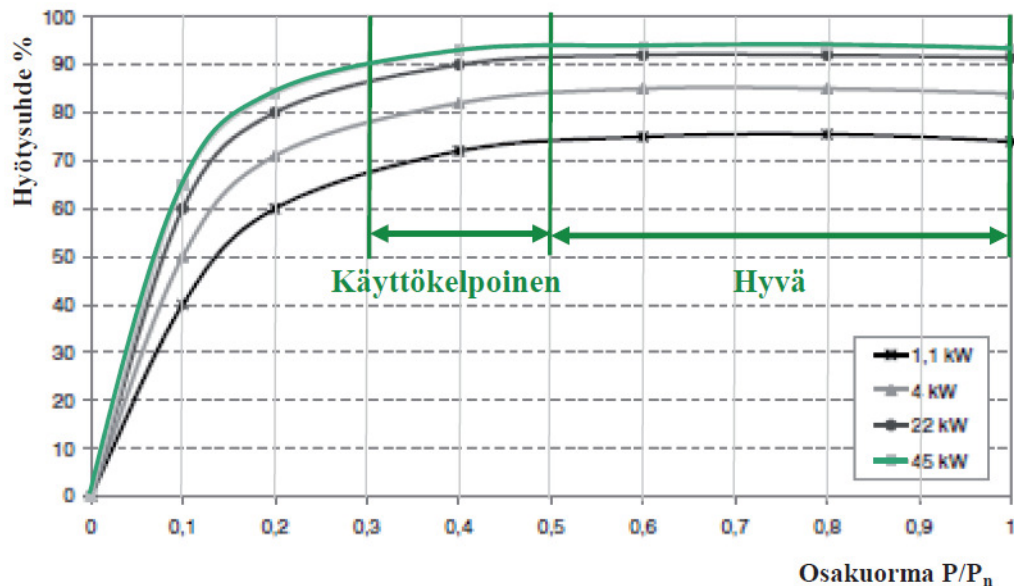
Kun staattoriin uriin jaettuun käämitykseen syötetään vaihtovirtaa, muodostuu sinimuotoinen magnetomotorinen voima, toisin sanoen staattorille muodostuu pyörivä magneet-

tikenttä, kiertokenttä. Kiertokenttä indusoi sähkövirran roottorin oikosuljettuun häkkikäämiin. Häkkikäämin sähkövirta magnetoi roottorin, jolloin roottorille syntyy magneettikenttä. Roottorin magneettikenttä pyrkii vastustamaan staattorin magneettikenttää, jonka vuoksi roottori lähtee pyörimään. (Sahlstén 2012a, 1.)

Moottorin pyörintänopeus määräytyy moottorin napapariluvun ja moottoria syöttävän vaihtosähkön taajuuden mukaan. Yhdessä napaparissa on kaksi napaa. Käytettäessä Suomessa käytössä olevaa 50Hz taajuutta 2-napaisen oikosulkumoottorin optimipyörintänopeus olisi 50 kierrosta sekunnissa, eli 3000 kierrosta minuutissa. Napapareja lisäämällä saadaan tehtyä hitaampi moottori. 4-napaisen moottorin optimipyörintänopeus olisi 50Hz taajuudella 1500 kierrosta minuutissa, 8 napaisen 750 ja niin edelleen. Oikosulkumoottoreissa on kuitenkin aina jättämä, jonka vuoksi esimerkiksi 2-napaisen moottorin todellinen kierrosnopeus on noin 2840 kierrosta minuutissa. Kierrosnopeus alenee useampinapaisilla moottoreilla suhteellisesti samalla tavalla kuin 2-napaisella moottorilla. (Sahlstén 2012b, 3.)

#### **4.1.2 Hyötysuhde**

Oikosulkumoottorin hyötysuhde ilman taajuusmuuttajaa on tyypillisesti noin 0,8-0,95. (Sahlstén 2012b, 3). Suuritehoisilla oikosulkumoottoreilla onkin varsin hyvä hyötysuhde, mutta se pienenee moottorien nimellistehon pienentyessä (Kuva 4). Oikosulkumoottorin hyötysuhde pysyy suhteellisen korkeana, kun pyörimisnopeus on 40-100% täydestä pyörimisnopeudesta, mutta hyötysuhde huononee merkittävästi pienillä, alle 40% pyörimisnopeuksilla (Kuva 4), jonka vuoksi alle 20Hz taajuuksia ei kannata käyttää. Oikosulkumoottorin ja taajuusmuuttajan yhteisen hyötysuhteen takia pienillä taajuuksilla ottoteho ei enää pienene, vaikka taajuutta pienennetään. Lisäksi oikosulkumoottori vaatisi erillistä jäähdytystä pienillä kierroksilla. Säädetävän oikosulkumoottorin hyötysuhdetta huonontaa jonkin verran taajuusmuuttajan tehohäviöt, jotka myös suurenevät prosentuaalisesti pienillä taajuuksilla. (Sahlsten 2012a, 128-130)



Kuva 4 Oikosulkumoottorin hyötysuhteet (Sahlstén 2012b, 5)

LVI-järjestelmien pumppu- ja puhallinkäyttöjen momenttikuormitus on neliöllinen, minkä ansiosta taajuusmuuttajien tehonmitoitus on helpompaa verrattuna esim. teollisuuden kuljettimiin, jotka vaativat vakiomomenttia (Sahlstén 2012a, 127.) Taajuusmuuttajassa neliöllistä momenttia voidaan käyttää vain nimellistaajuuteen tai jännitteeseen asti. Tämän jälkeen jännite ei kasva eli myös momentti vakioituu. Kuorman momentti jatkaa kuitenkin neliöllistä kasvuaan, ja jos moottori ei ole tarpeeksi iso, tullaan nopeasti pisteeseen, jossa moottorin momentinkehitys ei enää riitä ja taajuusmuuttajan suojaustoiminnot pysäyttävät moottorin. Tämän johdosta ylitaajuuksia ( $> 50$  Hz) tulee välttää talotekniikan käytöissä. (Sulku 2006, 4.)

Myös pumppujen ja puhallinmoottorien mekaanisen kestävyys suhteen saattaa olla ylikierrosrajoituksia. Poikkeuksena tästä ovat kokonaisvaltaisesti suunnitellut tuotteet, joiden ominaisuudet ja moottorien koot on suunniteltu korkeammille kierrosluvuille. (Sulku 2006, 4.) Näitä moottoreita voidaan ajaa jopa 100Hz taajuudella myös jatkuvalla käytöllä. Käytettävissä oleva taajuusalue riippuu moottorista, mutta usein on mahdollista käyttää oikosulkumoottoria lähtien 15 hertsistä aina 100 hertsin taajuudelle asti. (Yli-Olli 2015) Pienillä kierrosluvuilla moottorin jäähdytys saattaa kärsiä, kun moottorin akselille kytketty puhallin ei jäähdytä riittävästi moottoria. Ongelma ei ole erityisen suuri talotekniikan käytöissä, sillä neliöllisellä kuormituksella myös ottamateho laskee jyrkästi nopeuden pientyessä. (Sulku 2006, 4.)

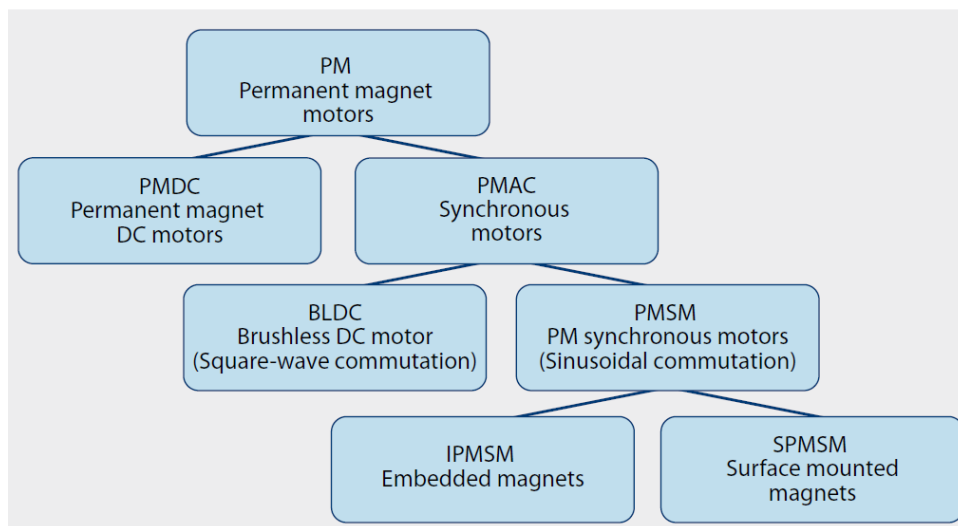
Taajuusmuuttajat voidaan liittää rakennusautomaatiojärjestelmään joko suorilla I/O-liitännöillä tai väyläratkaisulla. Väyläpohjaisten liityntöjen kautta on mahdollista saada hyödyllisiä lisätietoja, kuten tehonkulutus. Haittoina taajuusmuuttajaa käytettäessä ovat EMC-häiriöt ja niiden vähentämiseen liittyvät kustannukset (Sahlstén 2012a, 127).

## 4.2 EC-moottori

EC-moottorilla on integroitu elektroniikka, jolla pyörimisnopeuden muutos toteutetaan. EC-moottorit ovat kooltaan pieniä ja ne on usein integroitu kiinni puhaltimeen. Niitä on mahdollista ohjata jänniteviestillä ja joissain tapauksissa väylän kautta. EC-moottoreiden ominaisuudet ja liitännät riippuvat hyvin paljon valmistajasta.

### 4.2.1 Rakenne ja toimintaperiaate

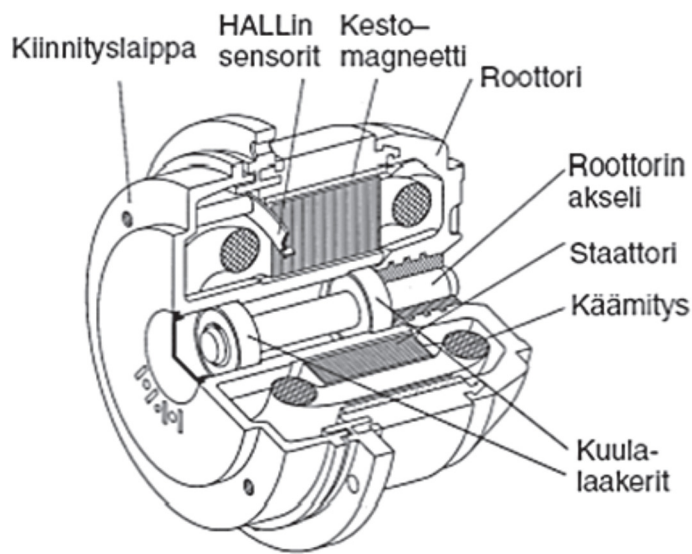
Elektronisesti kommutoidun tasavirtamoottorin yleinen nimitys EC-moottori tulee sanoista Electronically Commutated D.C. motor. EC-moottori on kestopagneettimoottori, kuten PM-moottori ja sen toinen nimitys BLDC tulee sanoista Brushless DC motor (harjaton tasavirtamoottori). Kestomagneettimoottoreita on monia eri versioita (Kuva 5). (Danfoss 2011a, 1.)



Kuva 5 Kestomagneettimoottoreiden jaottelu (Danfoss 2011a, 1)

EC-moottorissa tehonsäätö hoidetaan omalla elektroniikalla, eikä ulkopuolisia tehonsäätölaitteita, kuten taajuusmuuttajaa, tarvita (Sahlstén 2012a, 130).

EC-moottorissa ei käytetä kommutointiin hiiliharjoja, kuten perinteisessä tasavirtamoottorissa. Kommutointi tapahtuu staattorissa, jossa virta aikaansaa magneettikentän, joka puolestaan aiheuttaa virran kulkusuunnan vaihtelun staattorissa moottorin asennosta riippuen. Kommutoinnin pitää tapahtua tietyllä hetkellä. Tämän takia EC-moottorissa on sensoreita, joilla kommutointiyksikkö tietää roottorin asennon. Toimintaperiaatteen vuoksi EC-moottori on synkronikäyttöinen moottori, eikä siinä synny jälkikäyttöhäviöitä, kuten oikosulkumoottorissa. EC-moottorissa staattori on kiinteä ja roottori pyörii staattorin ympärillä. (Kuva 6) Staattori on yhdistetty roottorin akseliin kuulalaakereilla. (Sahlstén 2012a, 128.)



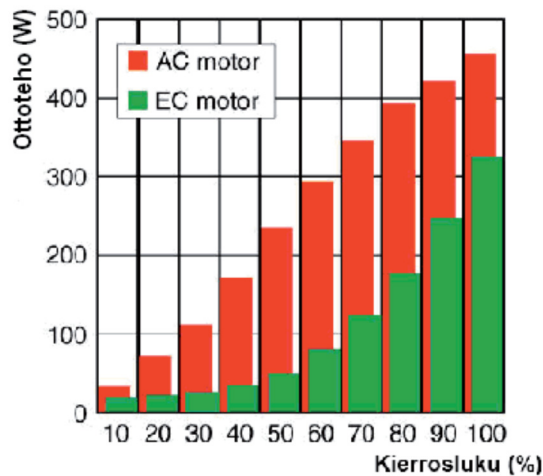
Kuva 6 EC-moottori (Sahlstén 2012b, 2)

#### 4.2.2 Hyötysuhde

Etenkin pienillä, alle 5kW EC-moottoreilla on merkittävästi parempi hyötysuhde kuin taajuusmuuttajalla ohjatuilla oikosulkumoottoreilla. Taulukossa 1 on vertailtu EC ja AC-moottoreiden tehonkulutusta eri kierrosluvuilla. Taulukosta nähdään, että EC-moottori ottaa vähemmän tehoa täydellä kierrosnopeudella ja kierrosnopeuden laskiessa EC- ja AC-moottorin ero tehon kulutuksessa kasvaa. EC-moottorin hyötysuhde verrattuna AC-moottoriin on siis parempi kaikilla nopeuksilla ja erityisesti pienillä nopeuksilla. (Sahlstén 2012a, 128–129.) On kuitenkin otettava huomioon, että AC-moottoreita on saatavilla monilla eri hyötysuhdeluokituksilla. Lisäksi pienet, alle 1kW EC-moottorit ovat yleensä paljon edullisempia, kuin vastaavan kokoinen oikosulkumoottori + taajuusmuuttaja (Yli-Olli 2015).



Taulukko 2. EC-moottori verrattuna oikosulkumoottoriin (Sahlstén 2012b, 4) (Huomioi, ettei AC-moottorin luokitusta ole merkitty.)



EC-moottorin pyörimisnopeutta ohjataan automatiikasta standardilla ohjausviestillä 0-10 V DC tai väyläliitynnällä. (Sahlstén 2012a, 131.) Useimmiten EC-moottorin kierrosnopeus on käytännössä säädettävissä välillä 12-100% täydestä kierrosnopeudesta (Yli-Olli 2015).

Sahlsténin mukaan EC-moottorin ja jakokeskuksen välisen kaapelin ei tarvitse olla häiriösuojattu, sillä EC-moottori ei tuota suurtaajuushäiriöitä, kuten taajuusmuuttaja. Tämän ansiosta on mahdollista käyttää olemassa olevia kaapelointeja, jos vaihdetaan olemassa olevan moottorin tilalle nopeussäädettävä EC-moottori. (Sahlstén 2012a, 132.)

EC moottorin käyttöä kannattaa harkita erityisesti sovelluksissa, joissa saavutettaisiin energiansäästöjä, jos moottorilla pääsisi tarvittaessa pienillekin nopeuksille. Eräs esimerkki tällaisesta on usean puhaltimen lauhdutin. Perinteisiä moottoreita käytettäessä moottorit pitäisi käynnistää pienillä tehoilla portaattain, ja tällöin lauhdutin viilentyisi vain päällä olevan puhaltimen kohdalta. EC-moottoreita käytettäessä puhaltimia voitaisiin ohjata samanaikaisesti pienilläkin nopeuksilla. Tällöin lauhdutin olisi koko pinta-alaltaan jäähdytetty myös pienillä osatehoilla. (Sahlstén 2012a, 132.)

#### 4.2.3 EC-moottori verrattuna oikosulkumoottoriin ja PM-moottoriin

EC-moottorilla ei ole erillistä taajuusmuuttajaa, vaan integroitu elektroniikka, joka muuntaa vaihtosähköä olevan syöttövirran moottorille tasasähköksi. Koska erillistä taa-

juusmuuttajaa ei ole, ei EC-moottorilla ole myöskään käytössä kaikkia taajuusmuuttajan monipuolisia liityntöjä ja toimintoja. EC-moottorin käyntiä ohjataan 0-10V ohjausviestillä, tai joissain tapauksissa väylällä. Alle 1V viestillä moottori on pysähdyksissä. 1-10V ohjausviestillä moottorin käyntiä voi ohjata minimin ja maksimin välillä.

EC-moottorin liitynnät automaatioon vaihtelevat jonkin verran eri valmistajien välillä. Esimerkiksi Fläkt Woodsilta on jo saatavissa EC-moottoreita, joilta saa automaatioon hälytyksen moottorin hälytysreleeltä, ja käynnin tilatiedon jännitereleeltä. Kyseisissä moottoreissa on myös Modbus RTU -väyläliityntämahdollisuus ja sisäänrakennettuja suojaustoimintoja. Väylän käyttö tuo EC-moottoriin paljon vastaavia ominaisuuksia, joita on taajuusmuuttajissa. Väylän kautta voi ohjata moottoria. Lisäksi väylän kautta saa paljon hyödyllistä tietoa, esimerkiksi tiedot moottorin tilasta, kuten tieto jumiutuneesta moottorista, hall-anturin viasta, moottorin tai elektroniikan ylikuumenemisesta tai vaiheviasta. Lisäksi väylän kautta on mahdollista saada varoitukset esimerkiksi ylikuumenemisesta, yli- ja alijännitteestä, tai nopeusrajojen alituksesta, tai ylityksestä. (Ebm – papst 2014, 24-70)

EC-moottoreita on saatavilla ainakin 5,5kW tehoon saakka. EC-moottorille ei suositella tehtäväksi muita huoltotoimenpiteitä, kuin silmämääräisiä tarkastuksia 6kk välein. Viikatilanteessa moottori lähetetään valmistajalle korjattavaksi/vaihdettavaksi. (Fläkt Woods 2012d, 8.) EC-moottorin laakereiden vaihto on haastavaa, ja useimmiten on järkevämpää vaihtaa koko moottori uuteen, kuin alkaa purkamaan moottoria ja vaihtamaan laakereita (Yli-Olli 2015).

Akselimomentti on EC-moottorilla huonompi verrattaessa PM-moottoriin kanttiaallon kommutoinnista ja sitä myötä korkeammista rautahäviöistä johtuen. Lisäksi virta on 1,22 kertaa suurempi kuin PM-moottoreissa, sillä se jakautuu kahdelle vaiheelle kolmen sijaan. (Danfoss 2012, 5.)

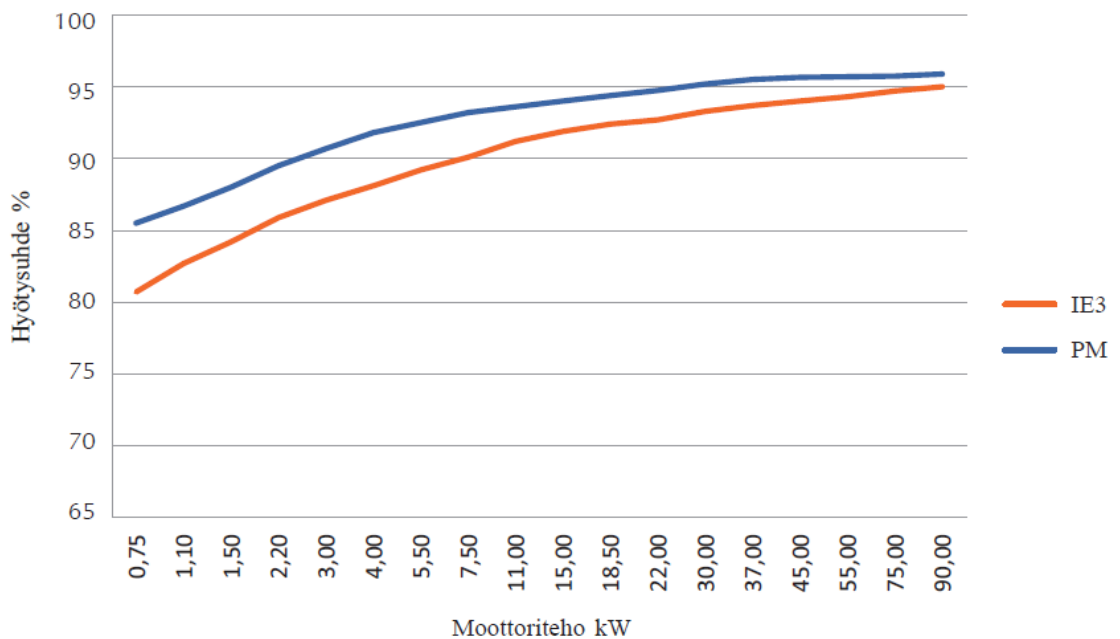
### **4.3 PM-moottori + taajuusmuuttaja**

PM-moottori on perinteisestä oikosulkumoottorista kehitetty moottori. Roottorikäämitys on korvattu kestopagneeteilla, jonka vuoksi roottorin magnetointihäviöt on saatu eliminoidua. Yleiskielessä puhuttaessa PM-moottorista puhutaan PMSM-tyyppisestä PM-moottorista (Kuva 5). PM-moottoria ei voi käyttää ilman taajuusmuuttajaa.

### 4.3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

PM-Moottorin nimi tulee englannin kielen sanoista Permanent Magnet motor, joka on suomennettuna kestopagneettimoottori. PM-moottori on rakenteeltaan lähes samanlainen, kuin perinteinen oikosulkumoottori. Runko, laakerointi ja staattorikäämitys ovat kuten oikosulkumoottorissa. Eroavaisuus näiden moottoreiden välillä on roottorikäämityksen sijasta kestopagneettimoottorin roottorissa olevat kestopagneetit, jotka magneetoivat roottorin. Tästä syystä roottorin magnetoimiseen ei tarvita sähkövirtaa ja roottorissa ei tapahdu juuri lainkaan häviöitä, joten hyötysuhde on parempi kuin perinteisellä oikosulkumoottorilla (Taulukko 2). (Sahlstén 2012b, 7.)

Taulukko 3. PM-moottori verrattuna IE3-luokan oikosulkumoottoriin (Sahlstén 2012b, 8)



Kestomagneettimoottorit voidaan jakaa magneettien asettelutavan mukaan pintamagneettimoottoreihin ja upotetuilla magneeteilla varustettuihin moottoreihin. Pintamagneettimoottoreissa magneetit on liimattu roottorin pintaan. Magneettien kiinnipysyminen on varmistettu roottorin ympäröivällä lasikuitupannalla. Upotetuilla magneeteilla varustetuissa moottoreissa magneetit on asennettu roottorilaminoinnin sisään.

Magneettien asettelutapa vaikuttaa roottorin magneettisiin ominaisuuksiin. Pintamagneettimoottori on magneettisesti lähes symmetrinen, eli roottorin magneettiset ominaisuudet ovat lähes samanlaiset riippumatta tarkastelusuunnasta. Upotetuilla magneeteilla

varustetun roottorin magneettiset ominaisuudet puolestaan ovat erilaiset riippuen tarkastelusuunnasta. Upotetuilla magneeteilla induktanssi on pienempi pitkittäisakselin suunnassa, kuin poikittaisakselin suunnassa. Induktanssierosta aiheutuu reduktanssivääntömomentti, jota voidaan hyödyntää moottorin säädössä. (Sahlstén 2012b, 7.)

#### 4.3.2 Hyötysuhde

Kestomagneettimoottorin hyötysuhde on oikosulkumoottoria parempi erityisesti pienillä nopeuksilla. Tästä syystä kestopagneettimoottori sopii hyvin säädettyihin moottorikäyttöihin, joissa ajetaan suuri osa ajasta alennetulla kierrosnopeudella. (Sahlstén 2012b, 7.)

Nopeussäädettäviä kestopagneettimoottoreita on saatavilla jopa 2500kW saakka, mutta suurten kestopagneettimoottoreiden maksimikierrosnopeus on vain 600 kierrosta minuutissa. (ABB 2015). Puhallinkäyttöön soveltuvia kestopagneettimoottoreita on saatavilla ainakin 0,8kW – 11kW tehoalueella (Fläkt Woods 2012a, 31-64).

PM-moottorit ovat runkokooltaan IEC standardin mukaisia, joten PM-moottori sopii mitoiltaan perinteisen oikosulkumoottorin tilalle. Kun PM-moottori tulee elinkaarensa päähän, se on siis helppo vaihtaa uuteen vastaavaan. PM-moottorit ovat kuitenkin yleensä mitoiltaan pienempiä, kuin vastaavan tehoinen oikosulkumoottori. Tämä pitää ottaa huomioon saneerauskohteiden moottoreita mitoittaessa. (Fläkt Woods 2012a, 7.)

Kestomagneettimoottorin huonoina puolina verrattuna oikosulkumoottoriin voisi pitää sitä, ettei sitä voi käyttää suoraan verkkovirralla, vaan väliin tarvitaan aina taajuusmuuttaja. Lisäksi kaikki taajuusmuuttajat eivät sovi kestopagneettimoottorikäyttöön, vaan moottorivalmistajalta on varmistettava, mikä taajuusmuuttaja kyseiselle moottorille tarvitaan. Suuritehoisilla kestopagneettimoottoreilla suurinta kierrosnopeutta rajoittaa mekaaninen kestävyys. Magneetit eivät pysy kiinni roottorissa suurilla kierrosnopeuksilla. Suuria moottoreita käytetäänkin vain 100-700 r/m nopeuksilla. (Sahlstén 2012b, 9.)

PM-moottoreissa on yleensä enemmän napoja, kuin vastaavissa oikosulkumoottoreissa. Siksi saman pyörimisnopeuden aikaansaamiseksi PM-moottori voi käydä jopa 200Hz taajuudella, kun oikosulkumoottori käy 100Hz taajuudella. Tästä johtuen PM-moottorin

säätöalue on jonkin verran laajempi. Oikosulkumoottoria voi käyttää yleensä 15-100Hz taajuudella ja PM moottoria 20-200Hz taajuudella. (Yli-Olli 2015)

#### **4.3.3 PM-moottori verrattuna oikosulkumoottoriin**

Taajuusmuuttajaohjattu oikosulkumoottori, ja taajuusmuuttajaohjattu PM-moottori eivät eroa toisistaan käytännössä kovinkaan paljoa. Merkittävin ero on, ettei PM-moottoria voi käyttää ohituskäytöllä, eli ilman taajuusmuuttajaa suoralla verkkovirralla. PM-moottorilla on myös hieman laajempi pyörimisnopeuden säätöalue. Muut eroavaisuudet ovat taloudellisia.

PM-moottori on kalliimpi hankkia, mutta sillä on parempi hyötysuhde, kuin oikosulkumoottorilla. Lisäksi PM-moottorille ei sovellu kaikki taajuusmuuttajat, vaan taajuusmuuttajan pitää olla nimenomaan PM-moottorille tehty. PM-moottoreiden taajuusmuuttajia on kuitenkin saatavilla aivan samoilla automaation liitännöillä ja ominaisuuksilla, kuin oikosulkumoottorin taajuusmuuttajia (Danfoss 2014, 10-12).

PM-moottorin kaapelointi ja tarvittavat huollotkin, kuten puhdistus, taajuusmuuttajan kondensaattoreiden vaihto ja moottorin laakereiden vaihto, ovat samat, kuin oikosulkumoottorilla. (ks. Danfoss 2011b, Fläkt Woods 2012b, Fläkt Woods 2012c.) PM-moottorin laakereiden vaihto on hieman vaikeampi toimenpide kuin perinteisellä oikosulkumoottorilla, mutta ei missään nimessä mahdoton. Oikosulkumoottorin laakerit kestävät ilmanvaihtokoneessa karkeasti arvioituna noin neljä vuotta ja PM-moottorissa hieman pidempään. Laakereiden paremmasta kestosta ei ole olemassa testiä, vaan tieto on saatu käyttäjiltä. Todennäköisesti laakereiden parempi kesto johtuu PM-moottorin alemmasta käyttölämpötilasta, joka puolestaan johtuu paremmasta hyötysuhteesta. (Yli-Olli 2015)

#### **4.4 Tahtireluktanssimoottori + taajuusmuuttaja**

ABB:n valikoimiin on tullut uutuutena tahtireluktanssimoottorit. Se on muilta osin kuin periteinen oikosulkumoottori, mutta sen roottori on tahtireluktanssiroottori, jossa syntyy paljon vähemmän häviöitä, kuin perinteisessä roottorissa. Tahtireluktanssimoottorin luvataan olevan hyötysuhteeltaan vähintään IE4-luokkaa, eli PM-moottorin tasolla, mutta se ei sisällä kestopagneetteja, joten se on edullisempi valmistaa. Tahtireluktanssi-

moottori on optimoitu taajuusmuuttajakäyttöön, eikä sitä voi käyttää suoraan verkkovirralla.

Tahtireluktanssimoottorit ovat myös IEC-runkokokojen mukaisia ja niiden taajuusmuuttajilla on samat toiminnot, kuin oikosulkumoottoreiden taajuusmuuttajilla. Tämän työn laskelmissa ei ole otettu tahtireluktanssimoottoria huomioon, sillä niitä ei ole vielä ilmanvaihtokonevalmistajien valikoimissa ja ne ovat teholtaan suuria, 11-350kW moottoreita. (Vuorivirta 2014)

#### **4.5 Lyhyt vertailu ominaisuuksista**

Taulukkoon 3 on koottu lyhyesti erityyppisten moottoreiden ominaisuudet. Esimerkiksi ovatko moottorit IEC-runkokokojen mukaisia, voiko niitä käyttää suoralla verkkovirralla ilman taajuusmuuttajaa, minkä tehoisia moottoreita on saatavissa, millä IP-luokituksilla moottoreita on saatavissa ja mitkä ovat sallitut moottoreiden ympäristön lämpötilat.

Taulukko 4. Moottoreiden ominaisuudet

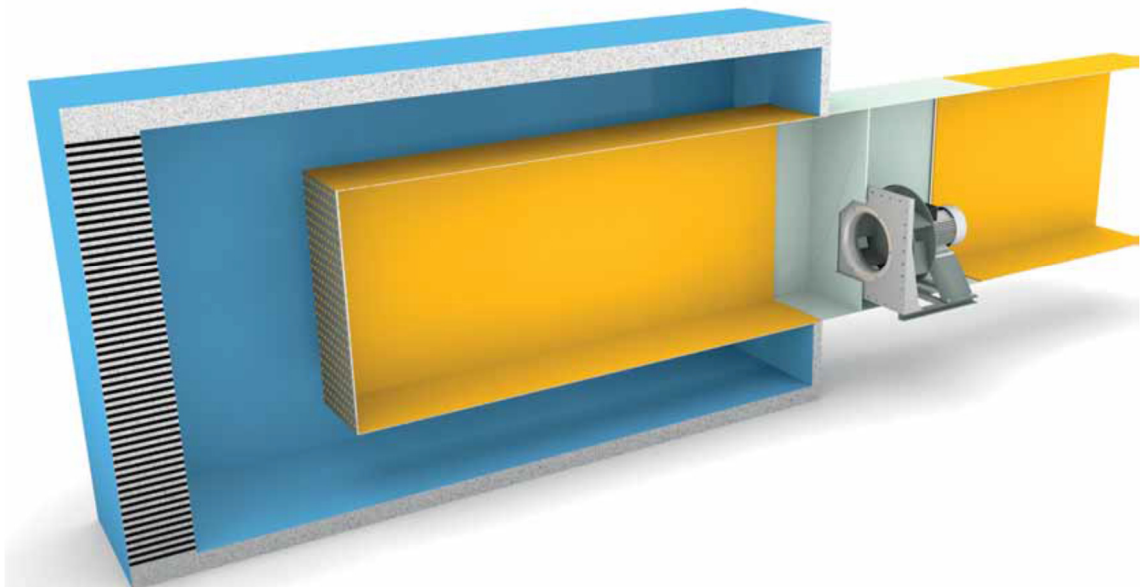
	<b>Oikosulkumoottori ABB vakiomoottorit + taajuusmuuttaja Danfoss VLT® Drive</b>	<b>PM-moottori (Fläktwoods Centriflow Plus PM) + taajuusmuuttaja Danfoss VLT® Drive</b>	<b>EC-moottori (Fläktwoods Centriflow Plus EC)</b>
<b>Saatavilla olevat koot</b>	IEC runkokoot	IEC runkokoot	Ei IEC standardikoossa
<b>Saatavilla olevat tehot</b>	moottori 0,06kW...250kW taajuusmuuttaja 0,25kW...1,2MW	moottori 0,8kW...11kW taajuusmuuttaja 0,25kW...22kW	moottori integroidulla elektroniikalla 0,5kW...5,5kW (myös hyvin pieniä moottoreita saatavilla eri valmistajilla)
<b>Käytettävissä olevat nopeusalueet</b>	15-100Hz (nimellinen 50Hz)	20-200Hz (nimellinen 50Hz)	12-100% (täydestä nopeudesta)
<b>Käyttö- lämpötila</b>	moottori: -20...+40°C taajuusmuuttaja: -15...+40°C (huurtumista ei sallita)	moottori: -15...+40°C taajuusmuuttaja: -15...+40°C (huurtumista ei sallita)	moottori integroidulla elektroniikalla -25 °C... +40 °C
<b>IP-luokat</b>	moottori IPXX - IP55 taajuusmuuttaja IPXX - IP66	moottori IPXX - IP54 taajuusmuuttaja IPXX - IP66	moottori integroidulla elektroniikalla IPXX - IP54
<b>Liitännät automaatioon</b>	Ohjelmoitavat digitaalitulot. Analogiset tulot. Ohjelmoitavat pulssitulot. Ohjelmoitavat digitaali- lähdöt. Ohjelmoitavat analogialähdöt. Ohjelmoitavat relälähdöt.	Samat ominaisuudet kuin oikosulkumoottorinkin taajuusmuuttajalla.	Ohjausjännite: 0...1V = seis 1...10V= min...maks.nopeus Relälähdöt: Käy Vika Väyläliitännät: Modbus RTU
<b>Sähköliityntä</b>	3-vaiheinen (häiriösuojattu kaapeli moottorin ja taajuusmuuttajan välille)	3-vaiheinen (häiriösuojattu kaapeli moottorin ja taajuusmuuttajan välille)	3-vaiheinen tai 1-vaiheinen
<b>Ohituskäyttö- mahdollisuus</b>	On	Ei	Ei
<b>Huollot</b>	<b>Taajuusmuuttaja:</b> Puhdistus, vikamuistin luku, jäähdytyspuhaltimien tarkastus sekä pölysuodattimien vaihto 6kk välein. Kondensaattoreiden vaihto n.10 vuoden välein. <b>Moottori:</b> Tarkastus ja puhdistus säännöllisesti. Laakereiden kestovoitelu kestää n.40000 tuntia. Moottorin laakereiden vaihto on mahdollista.	<b>Taajuusmuuttaja:</b> Samat kuin oikosulkumoottorin taajuusmuuttajilla. <b>Moottori:</b> Samat kuin oikosulkumoottorilla. Laakerit saattavat kestää hieman pidempään.	Silmämääräinen tarkastuksia 6kk välein. Vikatilanteessa moottori lähetetään valmistajalle korjattavaksi/vaihdettavaksi.
<b>Muuta</b>	Taajuusmuuttajalla on monipuolinen käyttöliittymä, jossa on näyttö ja jonka voi kytkeä tietokoneeseen. Taajuusmuuttajissa on paljon älyä, kuten ohjelmoitavat parametrit, ramppiajot, sisäisiä säätimiä, energiankulutuksen seuranta, jne.	Samat ominaisuudet, kun oikosulkumoottorin taajuusmuuttajalla.	Jos puhallin on ollut käyttämättä pitkän aikaa ulkoasennuksessa, suositellaan puhaltimen käynnistämistä vähintään kahden tunnin ajaksi, jotta kondenssi haihtuu.

#### 4.6 Moottoreiden hyötysuhteiden vertailu

Parempi hyötysuhde vaikuttaa suoraan moottorin energiankulutukseen, mutta se ei ole ainoa hyöty. Mitä parempi hyötysuhde sähkömoottorilla on, sitä vähemmän siinä syntyy lämpöä. 15°C lasku laakerin lämpötilassa kaksinkertaistaa voiteluvälin. Tästä johtuen paremmalla hyötysuhteella toimiva moottori on luotettavampi, sillä on pidemmät huoltovälit ja pidempi elinikä. (Vuorivirta 2014.)

Erityyppisten 3kW moottoreiden hyötysuhteita puhallinsovelluksessa on vertailtu IKL-Dresdenin teknisessä raportissa. IKL-Dresden on ilmapuhaltimen ja jäähdytyksen instituutti. Raportti on Danfoss Oy:n tilaama ja se on julkaistu vuonna 2013. (Franzke, U. 2013)

Tutkimusraportissaan IKL-Dresden oli asettanut jokaisen moottorin samanlaiseen testiympäristöön, joten tuloksia on helppo vertailla keskenään (Kuva 7)



Kuva 7. Testialusta (Franzke 2013, 6)



Tutkimuskohteina IKL-Dresden oli käyttänyt seuraavia laitteita:

- PM-moottori taajuusmuuttajalla
  - Puhallin: Nicotra Gebhardt (model RLM E6-3540) (Kuva 8)

AL-KO		89343 Jettingen	
RLM E6-0400			
-----			
DEVICE NO 150-950183-947740/1 YEAR OF MANUFACTURE 2012			
-----			
FAN		MOTOR	
-----			
n max.	= 2830	l/min	U N = 400 V(D)
Density	= 1.2	kg/m3	f N = 50 Hz
Tmax	= 40	°C	f B max = 48 Hz
			I N = 6.1 A
			n N = 2905 l/min
			n max. = 2830 l/min
			P N = 3 kW
			T M max = 40 °C
			Enclosure rating IP 55
			Thermal class F
			Type of current 3~
-----			
RLM E6-3540-2W-16-A3A			

Kuva 8. Testissä käytetyn puhaltimen tyyppikilpi (Franzke 2013, 9)

- Moottori: Lafert (Kuva 9)

<b>LAFERT</b>	
Type HPS 90 3000 64 IEC 60034 3-Mot № 805973	
Th.Cl.F IP 55 S1 T.amb. 40° C Weight=12.0kg	
B.E.M.F. 258V In=6,8A 3.0kW Mn=9.6 Nm	
Speed=3000 min <sup>-1</sup> Freq.=200Hz	
R <sub>f</sub> =0.98 Ohm L <sub>f</sub> =11.0mH ke=0.82Vs kt=1.42Nm/Amp	
REF.194812	
Protector Type PTC 140°C	0611




Kuva 9. Testissä käytetyn PM-moottorin tyyppikilpi (Franzke 2013, 9)

- Taajuusmuuttaja Danfoss HVAC Drive (Kuva 10)

<b>VLT®</b>	HVAC Drive
www.danfoss.com	
T/C: FC-102P3K0T4Z55H1XGX10SXXXXXAXBXXXXDX	
P/N: 131U5081 S/N: 027402G043	
3.0kW(400V) / 4.0HP(460V)	
IN: 3x380-480V 50/60Hz 6.5/5.7A	
OUT: 3x0-Vin 0-590Hz 7.2/6.3A	
Type 12 / IP55 Tamb. 45°C/113°F	
MADE IN DENMARK	
* 131U5081027402G043 *	

Kuva 10. Testissä käytetyn taajuusmuuttajan tyyppikilpi (Franzke 2013, 9)

- EC puhallin integroidulla moottorilla
  - Ebmpapst (model K3G400-AQ23) (Kuva 11)

<b>ebmpapst</b>	K3G400-AQ23-62		Made in Germany	DE(H)02/13	IE4
	3~ 380 - 480 VAC 50/60 Hz		(4.6 A 3000 W)	@400 V 2550 min <sup>-1</sup>	IP 54
	η =62.8% (A, static) N62 N=68.4 VSD integrated				
	CE	M3G150-FF max. 4,9A			
	cUL US	3~ 380-480V 50/60 Hz			
Electronically-Protected		Ins.CLF AO			
				1302001n	



Kuva 11. Testissä käytetyn EC-puhaltimen tyyppikilpi (Franzke 2013, 12)

- IE2-luokan oikosulkumoottori taajuusmuuttajalla
  - Puhallin: Nicotra Gebhardt (model RLM E6-3540)
  - Moottori: SIEMENS (Kuva 12)

SIEMENS		3-Mot 1LA9106-2KA60-Z (H)	IE2	CE
		UD 1212/1493886-001-004		
27 kg	IP 55	100L IM B3	IEC/EN 60034 ThC1155(F) -20°C ≤ TAMB ≤ 40°C	
50 Hz	400/690 V Δ/Y	3 kW	5.8/3.25 A	60 Hz 460 V Δ
cos φ 0.88	2890 l/min	IE2-84.6%	3.45 kW 5.6 A	cos φ 0.883490 l/min
IE2-87.5%				
33175 0000				

Kuva 12. Testissä käytetyn IE2-luokan moottorin tyyppikilpi (Franzke 2013, 11)

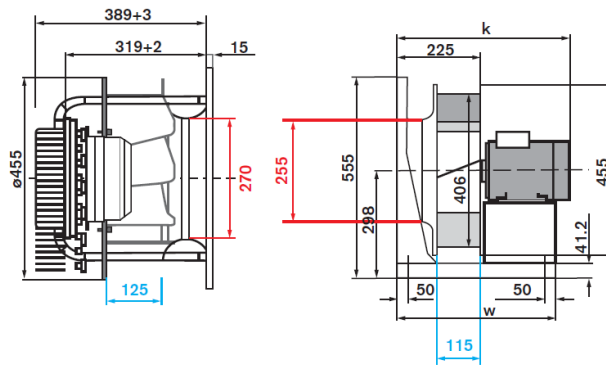
- Taajuusmuuttaja Danfoss HVAC Drive
- IE3-luokan oikosulkumoottori taajuusmuuttajalla
  - Puhallin: Nicotra Gebhardt (model RLM E6-3540)
  - Moottori: VEM (Kuva 13)

	VEM motors Thurm GmbH Made in Germany			IE3 87.1 %
IE3-W41R 100 L 2 TPM140 TK02/13				
1098929001302H		50 Hz	155	3 ~Mot
IM B3	cosφ	0,85	38 kg	
230/400 V Δ/Y		10,1 / 5,8 A		
S1	3,0 kW	2930 min <sup>-1</sup>		
IP 55 M <sub>BR</sub>	Nm Fl	c/h		
...	/	...	V	
...	/	A   LS mm		
...	min <sup>-1</sup>	cosφ		
DIN EN 60034-1				

Kuva 13. Testissä käytetyn IE3-luokan moottorin tyyppikilpi (Franzke 2013, 10)

- Taajuusmuuttaja Danfoss HVAC Drive

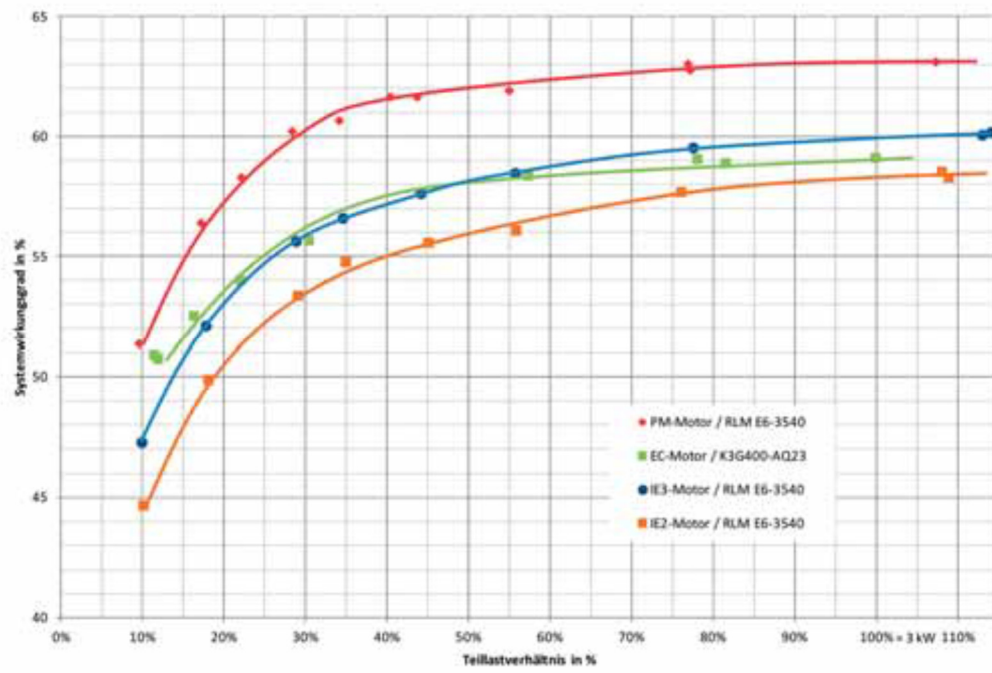
Testissä laitteissa käytettävät puhaltimet ovat samanlaisia, lukuun ottamatta EC-moottorilla varustettua puhallinta. Osa EC-moottorista on puhaltimen puolella, joka saattaa heikentää puhaltimen hyötysuhdetta. Toisaalta, kyseisen puhaltimen tulokanavan ja poistopuolen pinta-alat ovat hieman isompia, joka puolestaan parantaa hyötysuhdetta (Kuva 14).



Kuva 14. EC-puhallin verrattuna testin toiseen puhaltimeen (Franzke 2013, 12)

Taulukossa 5 on vaaka-akselilla moottorin kuormitus 0-110% ja pystyakselilla järjestelmän hyötysuhde 40-65%. Moottoreita ajettiin testissä kierrosnopeudesta 1200rpm alkaen moottorin aina maksimikierrosnopeudelle, eli noin 2900rpm asti. Punaisella värillä on PM-moottori, vihreällä EC, sinisellä IE3-luokan oikosulkumoottori ja oranssilla IE3-luokan oikosulkumoottori. Kuvasta näkee, että PM-moottorilla on koko nopeusalueella paras hyötysuhde. EC- ja IE3-luokan moottoreilla on noin 3% huonompi hyötysuhde koko nopeusalueella. IE2-luokan moottori jäi noin 5% PM-moottorin hyötysuhteesta. IE2- ja IE3-luokkien oikosulkumoottoreiden hyötysuhde laski hieman voimakkaammin, kuin PM-moottorin kuormitusta laskiessa. Hyötysuhteiden ero oli suurimmillaan 30% kuormituksella. Tuolloin ero oli noin 7%. EC-moottorilla oli IE3-luokan moottoria huonompi hyötysuhde suurella kuormituksella, mutta parempi pienellä kuormituksella.

Taulukko 5. Järjestelmien hyötysuhteet (Franzke 2013,16)



## 5 LASKENNAT

Moottoreista on mahdotonta tehdä täysin yksiselitteistä vertailua. Moottorin hankintahintaan vaikuttaa koneen koko, valmistaja, saatu tarjous ja mahdollisesti konetta varten otetun lainan korot. Sähkön hintaan vaikuttaa liittymän koko, mahdolliset tarjoukset ja sähkön hinnan kehitys. Sähkön kulutukseen vaikuttaa se, millaisilla nopeuksilla konetta ajetaan. Nämä kaikki puolestaan vaikuttavat takaisinmaksuaikaan. Laskelmat kannattaisi tehdä jokaiseen kohteeseen erikseen, sillä kohteet ovat erilaisia keskenään ja siitä syystä esimerkiksi takaisinmaksuajat voivat vaihdella hyvinkin paljon kohteesta riippuen.

Tässä opinnäytetyössä tein laskelmat kolmen eri kokoluokan ilmanvaihtokoneille.

Suoritin laskennat Kojan Future++ -ohjemalla. Tein laskennat 1m<sup>3</sup>, 5m<sup>3</sup> ja 10m<sup>3</sup> ilmamäärille mitoitetuille ilmanvaihtokoneille IE2 ja IE3-luokan oikosulkumoottorilla ja taajuusmuuttajalla, PM-moottorilla ja taajuusmuuttajalla sekä EC-moottorilla. Jokaisessa ilmanvaihtokoneessa on tulo- ja poistoilmasuodattimet, lämmitys- ja jäähdytyspatteerit, pyörivä LTO, 2 äänenvaimenninta ja koneen ulkoisena painehäviönä 250Pa. Otsapintanopeudet, koneiden mitat ja LTO ovat mahdollisimman samanlaiset. Myös puhaltimien SFP-luvut ja hankintahinta on valittu niin, ettei valinta suosisi mitään moottorityyppiä.

Tein ensin koneille laskennat, joissa niitä ajetaan jatkuvasti mitoitusilmamäärällä. Sen lisäksi tein laskelmat, joissa koneet käyvät mitoitusilmamäärällä arkisin klo 7-17 ja muina aikoina 25% teholla verrattuna mitoitusilmamäärään. Puhaltimien moottorit eivät ole samankokoisia, sillä Future++-ohjelma mitoittaa moottorit käymään niin, että ne vastaavat vaadittua ilmamäärää. Joissain tapauksissa moottorit on mitoitetu käymään mitoitusilmamäärällä yli nimellisnopeuden, joka on mahdollista taajuusmuuttajakäytöllä. Toisaalta joissain tapauksissa moottorit käyvät mitoitusilmamäärälläkin vain osateholla.

Kaikissa kokoluokissa IE2-luokan oikosulkumoottorilla oleva ilmanvaihtokone on sekä halvin, että eniten sähköä kuluttava, joten takaisinmaksuajat on laskettu vertaamalla muita koneita IE2-luokan koneeseen. Takaisinmaksuajoissa ei ole otettu huomioon mahdollisia lainojen korkoja, eikä sähkön hinnan nousua. Jos kone siis ostetaan lainara-

halla, takaisinmaksuaika kasvaa, mutta toisaalta sähkön hinnan nousun myötä takaisinmaksuaika todennäköisesti lyhenee huomattavasti.

Havainnollistamisen helpottamiseksi käytin laskelmissa sähkön hintana kiinteää 130€/MWh hintaa. Sähkön hinta on saatu laskemalla yhteen Tampereen sähkölaitoksen yrityksille (yli 3x63A liittymä) tarkoitetun Markkinasähkön hinta 7,66snt/kWh (sis. alv. 24%) ja yleissiirron energiamaksu 5,65snt/kWh (sis. alv. 24% ja sähköverot). Hinnat on luettu Tampereen sähkölaitoksen sivuilta 23.04.2015. Takaisinmaksuajat on laskettu yksinkertaisimmalla mahdollisella tavalla, joka on nähtävissä kaavassa:

$$takaisinmaksuaika\ vuosina = \frac{a - b}{c - d}$$

a = kalliimman IV-koneen hankintahinta

b = halvemman IV-koneen hankintahinta

c = halvemman IV-koneen sähkönkulutus vuodessa

d = kalliimman IV-koneen sähkönkulutus vuodessa

## 5.1 1m<sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet

Vertailun pienimmiksi ilmanvaihtokoneiksi valitsin 1m<sup>3</sup>/s koneet. Tässä kokoluokassa on mahdollista valita moottori neljästä erilaisesta vaihtoehdosta.

Taulukko 6. Jatkuvasti täydellä teholla käyvät 1m<sup>3</sup>/s koneet

24/7/365 100%				
	AC IE2	AC IE3	PM	EC
Moottorin teho	1,1kW	1,1kW	3,6kW	1,62kW
Ilmamäärä	1m <sup>3</sup> /s			
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa			
LTO hyötysuhde	85			
Otsapintanopeus Vo	1,7			
SFP	1,52	1,5	1,33	1,46
Hinta euroina	21 216	22 019	23 761	22 799
Lämmitys MWh/vuosi	5,6			
Jäähdytys MWh/vuosi	4,1			
Puhallin MWh/vuosi	13,5	13,3	11,8	13
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	1755	1729	1534	1690
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	30,9	11,5	24,4

Taulukkoa 1 tarkastellessa huomaa, että 1m<sup>3</sup>/s ilmamäärän ilmanvaihtokoneilla takaisinmaksuajat ovat pitkiä. Takaisinmaksuajan pituus aiheutuu siitä, että koneiden sähkönkulutus on pientä, joten myös koneiden väliset erot sähkönkulutuksessa ovat pieniä. Jos koneilla ajetaan jatkuvasti 1m<sup>3</sup>/s mitoitusilmamäärällä, PM-moottorilla varustettu kone maksaisi itsensä takaisin noin 11 vuodessa verrattuna IE2 luokan koneeseen (Taulukko1). Muilla moottorityypeillä takaisinmaksuaika olisi huomattavasti pidempi. Tässä laskelmassa EC- ja PM-moottori käyvät vain osateholla, eivätkä siksi pääse hyödyntämään parhaan hyötysuhteen käyntinopeutta. Jos laskentaohjelmasta olisi löytynyt sopivimmat moottorit, olisi hyötysuhde hieman parempi.

Taulukko 7. Tarpeen mukaan käyvät 1m<sup>3</sup>/s koneet

MA-PE 7-17 100%, muulloin 25%				
	AC IE2	AC IE3	PM	EC
Moottorin teho	1,1kW	1,1kW	3,6kW	1,62kW
Ilmamäärä	1m <sup>3</sup> /s			
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa			
LTO hyötysuhde	85			
Otsapintanopeus Vo	1,7			
SFP	1,52	1,5	1,33	1,46
Hinta euroina	21 216	21 978	23 761	22 799
Lämmitys MWh/vuosi	2,7			
Jäähdytys MWh/vuosi	2,7			
Puhallin MWh/vuosi	4,8	4,7	4,4	4,6
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	624	611	572	598
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	58,6	48,9	60,9

Jos koneilla ajetaan osa ajasta osateholla, takaisinmaksuaika kasvaa, sillä moottorin sähkönkulutus pienenee, ja tällöin myös säästö sähkönkulutuksessa verrattaessa toiseen koneeseen muodostuu niin pieneksi, että se on vain muutamia euroja vuodessa. Tähän kuitenkin vaikuttaa miten pienellä osateholla ajetaan ja kuinka kauan, eli se on täysin kohdekohtaista. Todella pitkistä takaisinmaksuajoista huolimatta tämän kokoluokan koneet eri moottoreilla ovat lähes saman hintaiset hankkia ja käyttää. (Taulukko 7). Taulukoista 1 ja 2 näkee, että EC-moottorilla varustettu kone on toiseksi energiatehokkain heti PM-moottorilla varustetun jälkeen, eikä prosentuaalinen hintaero IE3- ja EC-moottoreilla varustetuilla koneilla ole kovin suuri. Eri merkkisellä tai hieman eri tehoisella koneella EC-moottori voisi olla jopa taloudellisempi hankinta.

## 5.2 5m<sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet

Keskimmäiseksi kokoluokaksi valitsin 5m<sup>3</sup>/s ilmavaihtokoneet. Tässä kokoluokassa ei ole saatavilla EC-moottorilla varustettua konetta, jonka vuoksi sitä ei ole vertailussa.



Taulukko 8. Jatkuvasti täydellä teholla käyvät 5m³/s koneet

24/7/365 100%			
	AC IE2	AC IE3	PM
Moottorin teho	7,5kW	7,5kW	11kW
Ilmamäärä	5m³/s		
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa		
LTO hyötysuhde	78		
Otsapintanopeus Vo	1,8		
SFP	1,48	1,44	1,41
Hinta euroina	50 251	52 016	54 199
Lämmitys MWh/vuosi	37,9		
Jäähdytys MWh/vuosi	20,7		
Puhallin MWh/vuosi	65,9	64,1	62,6
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	8567	8333	8138
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	7,5	9,2

5m³/s ilmanvaihtokoneilla puhaltimien käydessä jatkuvasti täydellä mitoitus-tehoilla eroa sähkönkulutuksessa kertyy jo satoja euroja vuodessa ja takaisinmaksuajat ovat jo järkevällä tasolla. noin 9 vuoden käytön jälkeen PM moottori alkaisi ”tuottamaan” yli 400 euroa vuodessa verrattuna IE2-luokan moottoriin (Taulukko 8).

Taulukko 9. Tarpeen mukaan käyvät 5m<sup>3</sup>/s koneet

MA-PE 7-17 100%, muulloin 25%			
	AC IE2	AC IE3	PM
Moottorin teho	7,5kW	7,5kW	11kW
Ilmamäärä	5m <sup>3</sup> /s		
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa		
LTO hyötysuhde	78		
Otsapintanopeus Vo	1,8		
SFP	1,48	1,44	1,41
Hinta euroina	50 251	52 016	54 199
Lämmitys MWh/vuosi	18		
Jäähdytys MWh/vuosi	13,6		
Puhallin MWh/vuosi	23,9	23,3	22,2
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	3107	3029	2886
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	22,6	17,9

Taulukosta 9 näkee, että suurempitehoisillakin moottoreilla takaisinmaksuajat ovat pitkiä, jos niillä ajaa suuren osan ajasta pienillä osatehoilla. Esimerkiksi tässä tapauksessa IE2-luokan moottorilla ja PM-moottorilla varustetuilla ilmanvaihtokoneilla on hintaeroa lähes 4000 euroa, joka on suuri summa säästettäväksi muutaman prosentin erolla sähkönkulutuksessa.

### 5.3 10m<sup>3</sup> ilmanvaihtokoneet

Vertailun suurimmiksi ilmanvaihtokoneiksi valitsin 10m<sup>3</sup>/s koneet. Tämän kokoisilla koneilla vuosittainen sähkönkulutus on jo huomattavan suuri osa koneen hankintahinnasta.

Taulukko 10. Jatkuvasti täydellä teholla käyvät 10m³/s koneet

24/7/365 100%			
	AC IE2	AC IE3	PM
Moottorin teho	15kW	15kW	11kW
Ilmamäärä	10m³/s		
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa		
LTO hyötysuhde	80		
Otsapintanopeus Vo	1,9		
SFP	1,63	1,59	1,57
Hinta euroina	86 446	90 131	92 143
Lämmitys MWh/vuosi	68,7		
Jäähdytys MWh/vuosi	41,3		
Puhallin MWh/vuosi	144,9	141,2	139,6
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	18837	18356	18148
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	7,7	8,3

10m³/s ilmamäärän ilmanvaihtokoneella sähköenergian kulutus on jo huomattavan suurta. Jos puhaltimet käyvät jatkuvasti mitoitusilmamäärällä, noin 5 vuoden käytöllä puhaltimien kuluttama sähkö maksaa jo enemmän kuin koko ilmanvaihtokoneen hankinta (Taulukko 10). Jatkuvasti täydellä teholla käydessä PM-moottori maksaa itsensä takaisin tämän kokoluokan ilmanvaihtokoneella noin 8 vuodessa verrattuna IE2-luokan moottoriin. Säästö sähkön hinnassa tekee noin 700 euroa vuodessa. Tauluosta 11 näkee, että kun koneella ajetaan suuri osa ajasta pienillä osatehoilla, takaisinmaksuaika kasvaa noin 20 vuoteen.

Taulukko 11. Tarpeen mukaan käyvät 10m³/s koneet

MA-PE 7-17 100%, muulloin 25%			
	AC IE2	AC IE3	PM
Moottorin teho	15kW	15kW	11kW
Ilmamäärä	10m³/s		
Koneen ulkopuolinen painehäviö	250Pa		
LTO hyötysuhde	80		
Otsapintanopeus Vo	1,9		
SFP	1,63	1,59	1,57
Hinta euroina	86 446	90 131	92 143
Lämmitys MWh/vuosi	32,4		
Jäähdytys MWh/vuosi	27,2		
Puhallin MWh/vuosi	51,7	50,4	49,4
Puhallin €/vuosi (130€/MWh)	6721	6552	6422
Takaisinmaksuaika (vuotta)	-	21,8	19,1

PM-moottori on näiden laskentojen mukaan energiatehokkain, mutta myös kallein vaihtoehto ilmanvaihtokoneen puhaltimen moottoriksi. Mitä suurempitehoinen moottori on kyseessä, sitä suuremmat säästöt energiankulutuksessa sillä on mahdollista saavuttaa. IE2-luokan moottori on puolestaan huonoin vaihtoehto energiankulutusta ajatellen, mutta myös halvin. Jos laskelmissa olisi otettu huomioon sähköenergian hinnan nousu, olisivat tulokset muuttuneet energiatehokkaampien moottoreiden hyväksi. EC-moottoreita ei ole suurille tehoille saatavissa, jonka vuoksi EC-moottori ei ollut vaihtoehtona kaikissa laskelmissa.

Eräs asia, minkä näkee vertaamalla taulukoita keskenään, on tarpeenmukaisella säädöllä saavutettavat energiansäästöt. Esimerkiksi 11kW PM-moottorilla on mahdollista säästää sähköenergiaa noin 12 000 eurolla vuodessa tarpeenmukaisella säädöllä.

## 6 POHDINTA

PM-moottori osoittautui Future++-ohjelmalla tehdyissä laskelmissa ja IKL-Dresdenin tutkimuksessa tässä opinnäytetyössä vertailuista vaihtoehtoista hyötysuhteeltaan parhaaksi. Verrattaessa IE2-luokan moottoriin hyötysuhteiden ero oli noin 5% täydellä kuormituksella, ja kuormitusta laskiessa 30% täydestä hyötysuhteen ero kasvoi seitsemään prosenttiin. IE2-luokan oikosulkumoottori on hyötysuhteeltaan huonoin ja IE3-luokan oikosulkumoottori on IE2-luokan moottoria parempi, kuten odotinkin, mutta se ei yllä PM-moottorin tasolle. Moottoreiden hankintahinta puolestaan on sitä suurempi, mitä kehittyneempi moottori on, eli mitä parempi hyötysuhde moottorilla on. Kuitenkaan moottoreiden todelliset hankintahinnat eivät välttämättä eroa toisistaan niin paljon, kuin Future++ laskelmissa, sillä Futuren hinnat olivat kokonaisten ilmanvaihtokoneiden hintoja, joihin vaikuttaa ilmanvaihtokonevalmistajan oma hintapolitiikka.

PM-moottorin asennuskustannukset ovat samat, kuin vastaavalla oikosulkumoottorilla. Huollotkin ovat samat, mutta laakerit saattavat kestää PM-moottorissa hieman pidempään johtuen pienemmästä käyntilämpötilasta. PM-moottorit ovat IEC-runkokokojen mukaisia, joten PM-moottoria uusittaessa uusi moottori sopii vanhan kiinnikkeisiin. Myös taajuusmuuttaja on samalla tavalla vaihdettavissa, kun oikosulkumoottorilla, joten taajuusmuuttajan tai moottorin rikkoutuessa ei tarvitse uusia koko pakettia. Saneerauskohteissa on kuitenkin otettava huomioon, että PM-moottori on yleensä vastaavan tehoista oikosulkumoottoria pienempi. PM-moottorille ei käy sama taajuusmuuttaja kuin oikosulkumoottorille, vaan sen on oltava PM-moottorille tehty. PM-moottorin ainoat huonot puolet ovat korkea hankintahinta ja se, ettei sitä voi käyttää ilman taajuusmuuttajaa. Jos kohteessa ei vaadita moottorin suorakäyttömahdollisuutta, tarvitaan taajuusmuuttajan edistyneet toiminnot tai suurta tehoa, on PM-moottori paras vaihtoehto, jos sen saa järkevään hintaan.

EC-moottoreita ei ole tarjolla kovin suuria ja niiden ominaisuudet poikkeavat perinteisestä oikosulkumoottorista ja PM-moottorista, joten niitä ei voi suoraan verrata oikosulkumoottoriin ja PM-moottoriin. EC-moottorit ovat säädettäviä, mutta niillä ei ole yhtä pitkälle kehittyntä käyttöjärjestelmää, kuin taajuusmuuttajissa. Tosin joillain valmistajilla on mahdollista saada hälytystieto ja käynnin tilatieto erilliseltä releeltä. Lisäksi joissain EC-moottoreissa on myös väyläliityntä. Väylän kautta on mahdollista saada

paljonkin tietoa moottorilta, kuten käynnin tilatiedot, hälytykset, sekä tieto, mistä hälytys on aiheutunut. EC-moottoria tilattaessa pitääkin olla tarkkana, mitkä liittynät kyseiseen moottoriin on saatavilla ja millä liittynöillä sen valitsee. EC-moottorit pääsevät hyötysuhteeltaan IE3-luokan oikosulkumoottorin tasolle, tai ovat joissain tapauksissa jopa parempia. Etenkin pienet, alle 1kW EC-moottorit ovat myös edullisia ja tästä syystä pienitehoiseen sovellukseen, jossa ei vaadita kaikkia taajuusmuuttajan ominaisuuksia, EC-moottori on usein paras hankinta.

IE3-luokan moottori on hieman kalliimpi, kuin IE2-luokan, mutta myös taloudellisempi käyttää. IE3-luokan moottorit ovat kuitenkin perinteisiä oikosulkumoottoreita, joten niitä voi tarvittaessa käyttää myös ilman taajuusmuuttajaa. IE3-luokan perinteinen oikosulkumoottori olisi siis paras hankinta sovellukseen, jossa pitää olla ohituskäyttömahdollisuus, mutta energiankulutuksella on merkitystä.

IE2 luokan moottori on vertailun huonoin energiankulutukseltaan, mutta usein halvin hankkia. Se olisi siis paras sovellukseen, jota käytetään vain harvoin, tai jonka energiankulutuksella ei ole muuten suurta merkitystä.

Tahtireluktanssimoottorit ovat vielä nykyään liian suuria useimpiin taloteknisiin ratkaisuihin, mutta jos tulevaisuudessa niistä tehdään pienempitehoisia versioita, ne saattavat korvata PM- ja oikosulkumoottorit. Tahtireluktanssimoottorin hinta on perinteisen oikosulkumoottorin tasolla, sillä se ei sisällä kestopagneetteja. Kuitenkin se on hyötysuhteeltaan PM-moottorin tasolla.

Tehdessäni tätä työtä huomasin, että järjestelmän tarpeenmukaisella säädöllä on mahdollista saavuttaa mittavia energiasäästöjä, joten tarpeenmukaista säätöä kannattaa käyttää aina, kun mahdollista. Työssä selvisi myös, että oikeastaan kaikilla vertailun moottoreilla, myös nykyaikaisilla oikosulkumoottoreilla, on hyvin laaja säätöalue. Säätöalue on noin 15-100% täydestä pyörimisnopeudesta ja moottoreiden täydet pyörintänopeudet hertseinä riippuvat moottorista itsestään. Tämän vuoksi ei pidä olettaa, että taajuusmuuttajaohjattu moottori käy aina täyttä nopeutta 50Hz taajuudella.

Lisäksi huomasin, että järjestelmän energiankulutukseen vaikuttaa todella moni asia. Se, millaisella moottorilla säädön toteuttaa, ei vaikuta prosentuaalisesti kovin paljoa yksinään energiakulutukseen, mutta esimerkiksi suurissa puhaltimissa säästöä voi tästä huo-

limatta kertyä satoja euroja jo yhdessä vuodessa jo ainoastaan sillä, että puhaltimeen on valittu parempi moottori. Kun moottorivalinnan lisäksi tekee suunnitelmissa muitakin päätöksiä energiankulutusta silmälläpitäen, saa järjestelmästä vielä energiatehokkaamman.

## LÄHTEET

ABB 2015. <http://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/frequency-controlled-motors/permanent-magnet-motors> (viitattu 31.3.2015)

Danfoss 2011a. Energy efficiency in building services technology -asynchronous, EC or PM motors?

Danfoss 2012. ECplus. Johdonmukaista energiansäästöä. EC+ on fiksu trendi HVAC Drive –taajuusmuuttajatekniikassa.

Danfoss 2011b. HVAC Drive Ennakoiva huolto.

Danfoss 2014. VLT Product Catalogue.

D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012.

Ebm - papst Muldingen. 2014. MODBUS parameter specification for ebm-papst series 84 / 112 / 150 / 200 Lite V5.01 Lite.

Fläkt Woods 2012a. Centriflow Plus PM Technical data.

Fläkt Woods 2012b. PM-moottorin kytkentäohje.

Fläkt Woods 2012c. Asennus- ja huolto-ohje Fläkt Woods kolmivaihe vakio-oikosulkumoottori.

Fläkt Woods 2012d. Asennus- ja huolto-ohje EC-moottori.

Franzke, U. 2013. Investigation into fan system energy efficiency. Technical report. Dresden: ILK Dresden.

Reinikainen, R. 2002. Ilmanvaihtojärjestelmän käyttöikäsuunnittelu ja elinkaarikustannukset. Insinööritoimisto Olof Granlund Oy.

Sahlstén, T. 2012a. Taajuusmuuttajakäytöt ja EC-moottorit. Teoksessa V. Piikkilä (toim.) ST-Käsikirja 17, Rakennusautomaatiojärjestelmät, tietotekniset järjestelmät. Espoo: Sähköinfo Oy. 127-134.

Sahlstén, T. 2012b. ST 21.33 EC- ja PM-moottorit taloteknisissä järjestelmissä. Espoo: Sähköinfo Oy.

Sulku, J. 2006. ST 715.10 Taajuusmuuttajakäytöt rakennusautomaatiossa. Espoo: Sähköinfo Oy.

Vuorivirta, A. 2014. Uudet sähkömoottoritekniikat energiansäästöjen tuojana. Luentomateriaali, ABB.



Yli-Olli, J. 2015. Puhaltimien moottoreiden ja taajuusmuuttajien asiantuntija, Fläkt Woods Oy. Puhelinkeskustelu 08.04.2015